doi:10.13866/j.azr.2018.06.02

基于协调发展度模型的叶尔羌河健康评价①

何 兵, 高 凡, 唐小雨, 覃 姗
(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:确定有效指示河流健康状态及其变化的影响因子并进行评价,对于内陆河流生态水文保育与河流适应性管理至关重要。以叶尔羌河卡群—艾里克塔木段为评价河段,基于压力—状态—响应模型建立了包含23项指标的河流健康评价指标体系;提出"可达最佳状态"的河流健康评价标准;在此基础上,将协调发展度理论引入河流健康评价,建立了基于协调发展度的河流健康评价模型,并建立协调发展度评价标准等级及河流健康等级划分,对评价河段现状水平——2015年河流健康状态进行了评价与分析。结果表明:叶尔羌河评价河段协调发展 $D_{总}$ = 0.495,综合评价指数 $T_{总}$ = 0.537,协调发展类型属于"弱度不协调类",健康状况属于"亚健康"等级,即健康状况处于健康向不健康过渡的临界状态,河流健康状况受到威胁,在今后河流综合管理方面应考虑提高压力—状态—响应因子三系统要素间的协调发展水平,同时应以恢复响应因子下相应指标水平为主。

关键词:协调发展度;可达最佳标准;PSR模型;河流健康;叶尔羌河

河流是重要的自然生态系统之一,是维持陆地生态系统和水生态系统间物质循环、能量流动和信息传递的主要通道,不仅发挥着关键的生态功能[1-2],而且是各类水体中较易被开发利用的淡水资源,还发挥着重要的生态服务功能。河流健康评价源于河流系统的累加性破坏导致的河流受损事实,如河流水文连续性破坏导致的河流断流、河流结构性破坏导致的河流生物栖息地丧失及生物多样性受损、河流水质污染导致的河流功能性受损,以及河流综合服务功能受损导致的河流利用价值降低等[3]。河流健康评价作为河流管理的重要工具,在世界范围内得到了广泛应用。自20世纪80年代以来,以美国、澳大利亚、瑞典、英国、南非等为代表的西方发达国家在河流健康评价方面做了大量实践工作,并形成了包括RBP[4]、ISC[5]、WFD[6]、RCE[7]、RHS[8]、SRS[9]等为代表的河流健康评价方法。我国河流健康研究与评价工作始于20世纪90年代,并在长江、珠江、黄河、海河、辽河等大江大河相继进行了河流健康评价试点研究[10],于2010年启动了全国重要河湖健康试点评估工作,制定了《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》。

河流健康评价方法总体上可以划分为指示物种法和指标体系法[11]。由于在流域范围内对所有干扰都敏感的单一河流健康指标是不可能存在的[12],因此,综合物理、化学、生物、水文、社会经济的指标体系评价法成为当前河流健康评价的常用方法,并成为受人类活动影响下的河流健康评价的重要发展方向,具有不可替代的优越性[13]。据统计,2000年以来我国公开发表的以"河流健康"为主题的论文4 000余篇,且多集中在湿润、半湿润、半干旱地区的河流、湖泊、三角洲等区域,针对干旱区内陆河流健康评价的成果不足百篇,多集中在塔里木河、黑河、石羊河流域[14-15]。干旱区内陆河流域是水资源系统与生态环境系统最脆弱的流域之一,具有独特的河流系统特征。确定有效指示干旱内陆河流健康状态及其变化的评价方法,对于干旱内陆河流生态水文保育与河流适应性管理至关重要。目前,关于河流健康评价的方法众多,应用也较为广泛,如层次分析法、压力—状态—响应(pressure-state-response,PSR)模型、物元分析法、集对分析法、模糊综合评价法等[16-17],这些方法的优点在于可通过评分加权或归一化加权综合各影响因子以反映河流总体健康状况,但缺点是不能同时兼顾河流健康评价中的随机性与模糊性,且难以体现各影响因子间相互作用的

① **收稿日期**:2018-06-03; **修订日期**:2018-07-26
基金项目:国家自然科学基金项目(51769036);新疆自然科学基金项目(2017D01A43)
作者简介:何 兵(1992-),男,硕士研究生,研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用. E-mail:1223215435@qq.com
通讯作者:高 凡. E-mail:gutongfan0202@163.com

对比关系。协调发展度模型是描述系统要素间发展水平与协调效应的综合状态，并给予离差系数最小化理论推导出的一种协调度模型，可用于系统要素间协调发展程度的定量评价[18]，近年来在社会、经济、环境等领域应用较为广泛，在河流健康评价领域，特别是影响河流健康的要素间对比与相互作用关系研究较少[17]。基于此，本文以叶尔羌河为评价对象，在参考水利部《河流健康评估指标、标准与方法（试点工作用）》基础上，依据干旱区内陆河流生态水文特征，基于压力—状态—响应模型框架结合主成分分析法和问卷调查法等筛选关键指标，构建干旱区内陆河流健康评价指标体系，提出“可达最佳状态”的评价标准，应用内部权重与用户权重相结合的主客观权重综合法设置指标权重，并将协调发展度模型引入河流健康评价中，建立基于协调发展度的河流健康评价模型，通过实例研究，以期为该类型河流生态环境保护和水资源适应性管理提供科学依据和技术支撑。

1　研究区概况与数据资料收集

叶尔羌河是塔里木河流域“四源一干”水系格局的重要组成部分，干流全长 1 078 km，多年平均河川径流量 65.45 × 10^{8} m^{3}。目前，该流域突出的问题表现为春灌缺水、夏洪突出、盐渍化及沙漠化趋势增加、向塔里木河生态输水严重不足、水资源供需矛盾突出、生产生活挤占生态用水现象显著等[19-20]。

针对河流健康概念界定的三要素：定义主体、研究对象、参照标准，根据干旱区内陆河流生态水文特征[11,21]，将叶尔羌河河流健康概念定义为，可为人类健康工作的河流复合生态系统健康[15]。同时，借鉴地理学空间尺度概念中河流健康评价的点尺度（点位、断面）、线尺度（河流、河段）、面尺度（流域、水系）划分，采用点尺度与线尺度嵌套的空间尺度界定方法，评价范围为叶尔羌河干流卡群渠首断面至艾里克塔木渠首断面（以下简称 S 河段，长 333 km），见图1。考虑到S河段内灌区的分布、资料易

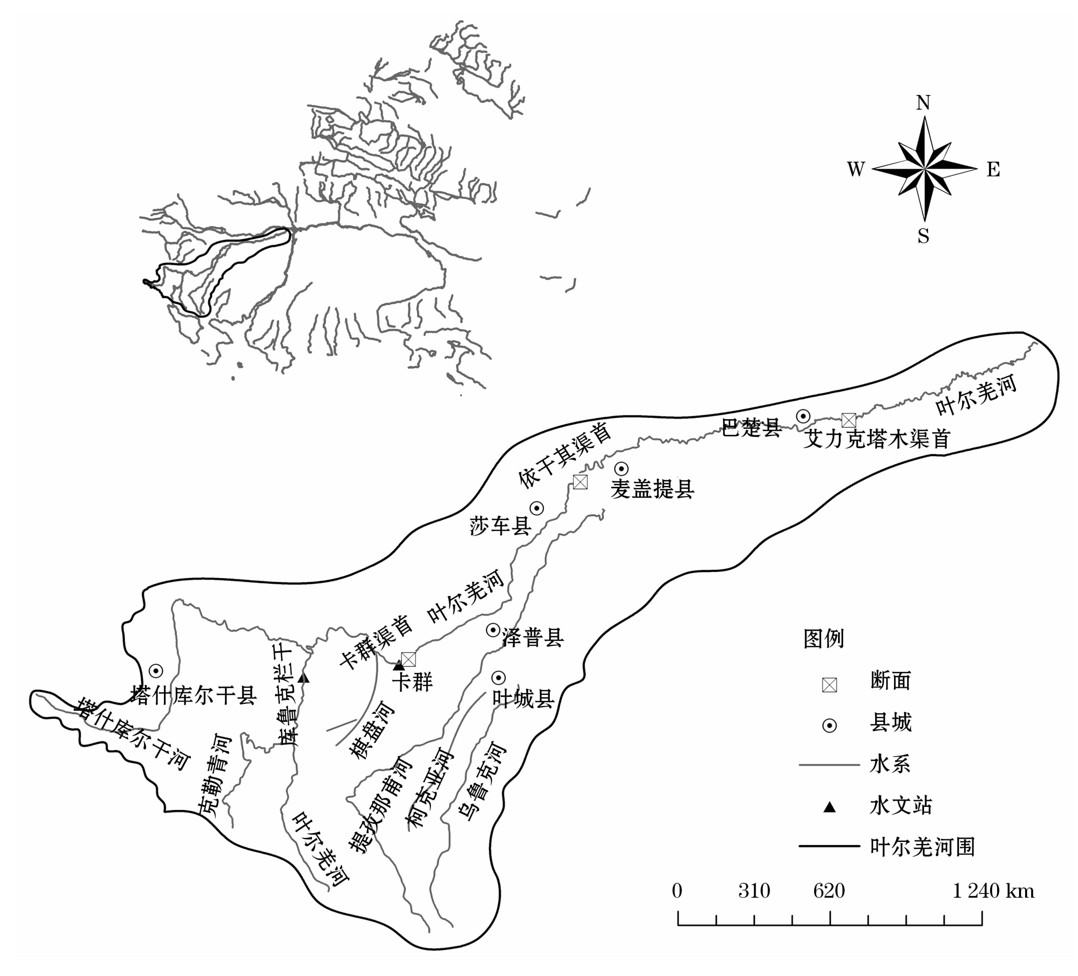


图 1　叶尔羌河流域范围及水系站点分布示意图

Fig. 1　Schematic map of the Yarkant River basin and the distribution of hydrometric stations

获取以及水功能区划分等情况,将 S 河段分为两个子河段,分别为:卡群渠首至依干其渠首断面(以下简称 S1 河段,长 60 km)。依干其渠首至艾里克塔木渠首断面(以下简称 S2 河段,长 273 km)。评价的时间尺度为 2015 年。评价所需数据资料来自叶尔羌河流域管理局 1962—2015 年水文站降水、蒸发、泥沙、水位、实测流量等数据,并参考相关文献、流域规划报告、统计年鉴、以及相关专业报告等。

2 河流健康评价指标体系与评价标准

2.1 基于 PSR 模型的河流健康评价指标体系构建

"压力—状态—响应"(PSR)模型广泛应用于生态安全评价、土地资源质量评价、土地利用可持续评价、以及生态系统健康评价等领域[11]。依据指标体系构建的科学性、系统性、层次性、独立性和指标定量性与可操作性等原则,考虑干旱区内陆河流关键生态环境机理,分别从压力、状态、响应层面选择指标,采用主成分分析法与设计问卷调查法筛选关键指标,其中设计问卷调查法通过被调查人员(相关领域专家、流域管理局人员、公众等)对河流健康影响因子重要程度的排序进行评分[22],构建叶尔羌河河流健康评价指标体系,共计 23 项指标(表 1)。

2.2 基于"可达最佳状态"的河流健康评价标准

河流健康是一个相对的概念,需要选择参照状态,即河流健康标准[15]。参照状态(reference condition,RC)旨在定义和表征河流在自然条件下应有的

表 1 叶尔羌河卡群—艾力克塔木段河流健康评价指标体系及权重系数

Tab.1 River health assessment index system and weight coefficient of the Kaqung-Ayriktam section of the Yarkant River

目标层	准则层(综合)		指标层(综合)	内置	用户	综合	指标层物理含义
河流健康综合指数 *A*1	压力因子 *B*1 0.356	自然压力指标 *C*1 0.259	年平均降水量 *D*1	0.250	0.453	0.306	评价河段多年平均降水量
			年径流量 *D*2	0.500	0.483	0.651	评价河段多年平均径流量
			年平均蒸发量 *D*3	0.250	0.064	0.043	评价河段多年平均蒸发量
		人为压力指标 *C*2 0.741	人口密度 *D*4	0.125	0.751	0.717	流域范围内人口数量与流域面积的比值
			水资源开发利用率 *D*5	0.250	0.030	0.057	评价时段水资源开发量占水资源总量比
			地下水开采率 *D*6	0.250	0.012	0.023	评价时段地下水开发量占地下水可开采量比
			城镇化率 *D*7	0.125	0.203	0.194	评价时段非农业人口数与农业人口数的比值
			灌溉水利用系数 *D*8	0.250	0.004	0.009	指在一次灌水期间被农作物利用的净水量与水源渠首处总引进水量的比值
	状态因子 *B*2 0.366	河流形态指标 *C*3 0.081	河流综合稳定系数 *D*9	0.261	0.621	0.566	评价时段内冲刷崩塌的河岸总长度占河流总长度的比值
			纵向连通性 *D*10	0.328	0.378	0.433	在河流系统内生态元素在空间结构上的纵向联系
			河道蜿蜒性 *D*11	0.411	0.001	0.001	河道蜿蜒性即流量变幅,一条健康的河流应当具有波动的水流和周期性的丰枯变化
		河流水文指标 *C*4 0.356	流量变化率 *D*12	0.333	0.004	0.004	评价时段年经流量与多年径流量之差与多年径流量的比值
			水沙平衡程度 *D*13	0.333	0.418	0.418	年均含沙量和年均流量之比
			地下水埋深 *D*14	0.334	0.578	0.578	评价时段河岸带一定范围内地下水平均埋深
		河流水质指标 *C*5 0.413	水质综合污染指数 *D*15	1.000	1.000	1.000	是评价水环境质量的一种重要方法,是在单项污染指数评价的基础上计算得到的
		河流生态指标 *C*6 0.150	特色生物存活状况 *D*16	0.143	0.336	0.217	评价时段流域特色及濒危动植物生存状况调查的定性指标
			天然植被覆盖率 *D*17	0.285	0.586	0.704	评价时段河段一定范围内天然植被 NDVI 值
			盐渍化面积比率 *D*18	0.286	0.069	0.010	评价时段河段盐渍化面积占流域面积比
			荒漠化面积比率 *D*19	0.286	0.009	0.069	评价时段河段盐渍化面积占流域面积比
	响应因子 *B*3 0.278	社会功能指标 *C*7 1.000	灌溉供水保证率 *D*20	0.289	0.071	0.074	评价时段有效灌溉面积与实际灌水面积的比值
			防洪工程状况 *D*21	0.289	0.800	0.840	河流达标堤防长度占河流堤防总长度的比例
			塔里木河生态输水满足率 *D*22	0.246	0.010	0.016	向塔里木河实际生态输水与目标生态输水的比值
			河流景观效应 *D*23	0.176	0.111	0.007	反映出人类对于河流亲和度的定性指标

状态,被越来越多地作为基准应用于评估人类活动干扰程度[23]。当前研究对参考状态的理解,主要包括最小干扰状态(MDC)、历史参考状态(HC)、最低干扰状态(LDC)、最佳可达状态(BAC)[24]。本文以“近自然准则”为原则,依据国家和地方相关标准和规范,借鉴国内外有关河流健康标准成果,并聘请行业专家、流域管理人员及沿岸居民公众,人为规定一种通过有效调控与管理可达的期望状态作为河流健康评价标准,构建基于“可达最佳状态”的叶尔羌河河流健康评价标准,避免以河流天然状态为基准而可能导致的忽略河流保护目标实现的可能性与可操作性弊端(表2和表3)。该标准以“很健康、健康、亚健康、不健康”为河流健康评价等级[17],评价标准中指标阈值范围的确定依据指标类型(定量指标和定性指标)分别率定,对于定性指标(土著水生生物存活状况、河流景观效应),聘请专家采用赋分法用分值<20、20~40、40~60、60~80、>80分别对应5个级别;对于定量指标,借鉴历史资料、流域实际及国家标准,并充分听取社会各方利益者的意见后,通过对比分析确定。

表2　河流健康等级及其含义

Tab.2　River health levels and their definitions

总体健康指数值	健康等级	含义
〔0.8,1.0〕	很健康Ⅰ	河流形态结构完整,各项功能均衡发挥,并满足人类经济发展对河流资源的合理需求
〔0.6,0.8)	健康Ⅱ	河流形态结构相对完整,基本满足人类经济发展对河流资源的合理需求
〔0.4,0.6)	亚健康Ⅲ	处于健康和病态之间的过渡状态,河流的某些功能下降,存在病态征兆
〔0.2,0.4)	不健康Ⅳ	河流的较多功能受到严重破坏,但一些功能勉强维持,河流生命状态受到威胁
(0,0.2)	病危Ⅴ	除极个别功能,河流基本丧失功能

表3　叶尔羌河卡群—艾力克塔木段河流健康评价标准

Tab.3　River health assessment criteria for the Kaqung-Ayriktam section of the Yarkant River

指标名称	单位	河流指标健康等级				
		很健康Ⅰ	健康Ⅱ	亚健康Ⅲ	不健康Ⅳ	病态Ⅴ
年平均降水量	mm	>100	100~80	80~60	60~40	<40
年径流量	10^8 m^3	>80	60~80	40~60	20~40	<20
年平均蒸发量	mm	<1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	2 000~2 500	>2 500
人口密度	人·km^{-2}	<30	30~120	120~200	200~250	>250
水资源开发率	%	≤20	20~40	40~60	60~80	≥80
地下水开采率	%	≤20	20~40	40~60	60~70	≥70
城镇化率	%	>60	60~40	40~15	15~10	<10
灌溉水利用系数		≥0.6	0.5~0.6	0.4~0.5	0.3~0.4	≤0.3
河流综合稳定系数	%	≥90	90~50	30~50	10~30	≤10
纵向连通性	个·$(100km)^{-1}$	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1.2	≤1.2
河道蜿蜒性	%	≥95	75~95	45~65	25~45	<25
流量变化率	%	≥120	100~120	80~100	60~80	≤60
水沙平衡程度	%	≤30	30~50	50~70	70~90	≥90
地下水埋深	m	2~3	1~2	3~7	7~10	>10,<1
水质综合污染指数		≤0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~1.6	≥1.6
特色生物存活状况(定性)	%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
天然植被覆盖率	%	>80	60~80	40~60	20~40	<20
盐渍化面积比率	%	<5	5~10	10~15	15~20	>20
荒漠化面积比率	%	<0	0~5	5~10	10~15	>15
灌溉供水保证率	%	≥80	70~80	60~70	40~60	≤40
防洪工程状况	%	≥95	85~95	75~85	65~75	<65
塔里木河生态输水满足率	%	≥90	70~90	60~70	50~60	≤50
河流景观效应(定性)	%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20

3 基于协调发展度的河流健康评价模型

3.1 协调发展理论与模型原理

协调是两种或两种以上系统或系统要素间和谐一致的一种良性的相互联系，是系统间或系统内要素间配合得当、和谐一致、良性循环的关系[25]。协调度用于定量描述系统间或系统要素间在发展变化过程中彼此和谐一致的协调程度。发展是系统或系统要素本身从简单到复杂、从低级到高级、从无序到有序的演化过程[26]。协调发展是协调与发展概念的交集，强调两者之间整体性 综合性和内在聚合性，是在协调这一有益约束与规定下的综合发展。综上所述，协调发展度模型的基本原理是将协调和综合发展水平相结合而形成协调发展度，用以反映系统或系统要素间的综合协调发展程度。

3.2 原始指标数据无量纲化处理

考虑到各评价指标量纲 数量级和数量变化幅度的差异，笔者对评价指标采用极值处理法进行无量纲化处理。其中，正向型指标和逆向型指标的无量纲化过程分别如式(1)和式(2)：

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-m_j}{M_j-m_i} \qquad (1)$$

$$y_{ij}=\frac{M_j-x_{ij}}{M_j-m_i} \qquad (2)$$

式中：y_{ij}为无量纲化后的指标数据值；x_{ij}为指标的原始数据值；M_j、m_j 为指标原始数据值可能取得的最大值和最小值。经过极值法处理后的各指标数据 $y_{ij}\in[0,1]$。

3.3 内置权重、用户权重与综合权重

采用内置权重与用户权重相结合的主客观赋权法对指标进行赋权。其中，内置权重系数采用层次分析法获得。用户权重系数采用客观赋权法——熵权法计算。依据信息论基本原理，信息量越大，不确定性越小，熵越小；反之，信息量越小，不确定性越大，熵越大[27]。

设有 m 个河段，n 项指标，构成原始数据矩阵 $(x_{ij})m\times n$。

(1) 归一化处理：

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X_{ij}},\quad (i=1,2,\cdots,m;j=i=1,2,\cdots,n) \quad (3)$$

(2) 计算第 j 项指标的信息熵：

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij} \qquad (4)$$

(3) 计算第 j 项指标的权重，令

$$u_j=1-e_j,\quad (j=1,2,\cdots,n) \qquad (5)$$

对 u_j 进行归一化处理，得 $\Sigma w_j=1$，第 j 项的指标权重 w_j 为：

$$w_j=\frac{u_j}{\sum_{j=1}^{n}u_j};\quad (j=1,2,\cdots,n) \qquad (6)$$

在综合考虑主客观因素基础上，将内置权重与用户权重综合，计算各指标综合权重，公式为：

$$Q_j=\frac{v_i\times w_j}{\sum_{j=1}^{n}v_i\times w_j} \qquad (7)$$

式中：Q_j 为综合权重系数；v_i 为内置权重系数；w_j 为用户权重系数。

3.4 压力、状态和响应因子评价函数模型

根据协调度定义，将河流健康综合指数根据 PSR 模型框架划分为 3 个子健康评价因子，即压力、状态、响应因子。设 $f(x)$、$g(y)$、$h(z)$ 分别为压力、状态和响应因子综合评价函数，则函数表达式分别为[23,25]：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{p}w_i\times x_i$$

$$g(y)=\sum_{j=1}^{m}w_j\times y_j \qquad (8)$$

$$h(z)=\sum_{j=1}^{n}w_k\times z_k$$

式中：x_i、y_j、z_k 分别为压力因子、状态因子和响应因子评价指标层下各指标的标准化值；w_i、w_j、w_k 分别为压力、状态和响应因子评价指标层各指标的权重。

3.5 压力、状态和响应因子协调度评价模型

离差系数可以反映系统要素之间的组合协调数量程度，并表征系统要素之间运动轨迹的协同程度和接近程度，因此，可用离差系数来度量系统间协调度[17,28]。本文借鉴物理学中关于容量耦合概念及容量耦合系数模型，并参考段海燕等[29]、吴玉鸣等[30]、党建华等[27]的相关研究，推导得压力、状态、响应因子的 3 个子健康评价因子相互作用的协调度模型，公式为：

$$C = \left[\frac{f(x) \times g(y) \times h(z)}{[f(x)+g(y)] \times [f(x)+h(z)] \times [g(y)+h(z)]} \right]^{1/k} \quad (9)$$

式中:C 为协调度,反映了河流健康综合指数中压力因子、状态因子和响应因子之间的协调程度;$0 < C < 1$;k 为调节数,$k \geqslant 3$,本文研究中 $k = 3$。

3.6　河流健康综合指数协调发展度评价模型

利用协调度反映系统要素间运动轨迹的协同性和接近程度,在两系统要素都具有较低或较高的发展程度时,协调度可能相同。因此,本文通过引入协调发展度的概念[26-27]反映压力、状态和响应因子间的协调状况,同时避免上述情况发生,客观反映发展水平高低,公式如下:

$$D = \sqrt{C \times T}, \quad T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (10)$$

式中:D 为协调发展度,反映河流健康综合指数中压力、状态、响应因子间的协调发展状况,其中协调发展度大的河流较协调发展度小的河流更加稳定有序,$0 \leqslant D \leqslant 1$;$T$ 为压力、状态和响应因子综合评价指数,反映河流系统的健康状况;α、β、γ 待定权重,考虑到压力、状态和响应因子为 PSR 模型框架下的河流健康评价指数因子,缺一不可,具有同等重要的地位,故取 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$。

3.7　河流系统总体协调发展状况

为研究叶尔羌河干流河段(卡群—艾力克塔木河段)的总体协调发展状况,根据协调发展度评价模型,需要计算河流总体的压力因子综合评价函数 $F(x)$、状态因子综合评价函数 $G(y)$ 和响应因子综合评价函数 $H(z)$,公式[26,31]如下:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{N} \frac{f(xi) \times Si}{S}$$

$$G(y) = \sum_{i=1}^{N} \frac{g(yi) \times Si}{S} \quad (11)$$

$$G(z) = \sum_{i=1}^{N} \frac{h(zi) \times Si}{S}$$

式中:$f(xi)$、$g(yi)$、$h(zi)$ 分别为叶尔羌河干流各河段的压力、状态和响应因子综合评价函数;N 为各河段的总个数($N = 2$);Si 为第 i 个河段的长度;S 为河流的总长度,即 $S = S1 + S2$。

将 $F(x)$、$G(y)$ 和 $H(z)$ 代入式(9)、式(10)中,可求得河流总体的协调度 $C_{总}$ 综合评价指数 $T_{总}$ 和协调发展度 $D_{总}$。

3.8　协调发展度评价标准等级和河流健康等级划分

以本文建立的“可达最佳状态”河流健康评价标准为基础,借鉴参考协调发展等级[29,32]划分方法,将压力、状态、响应因子的协调发展度划分为协调发展(0.7~1)、过渡发展(0.4~0.69)、失调发展(0~0.39)3 大类 10 小类,并与河流健康评价 5 个等级划分形成对应,构建基于河流健康管理的综合评价框架,见表 4。

表 4　协调发展度评价标准等级及河流健康等级划分

Tab.4　Division of evaluation standard grades and river health level for harmonious development

分类	协调发展度 D	类型	综合评价指数 T	类型
协调发展区间	0.9~1.0	极度协调	0.8~1	很健康
	0.8~0.89	高度协调		
	0.7~0.79	中度协调	0.6~0.79	健康
过渡发展区间	0.6~0.69	低度协调		
	0.5~0.59	弱度协调	0.4~0.59	亚健康
	0.4~0.49	弱度不协调		
失调发展区间	0.3~0.39	低度不协调	0.2~0.39	不健康
	0.2~0.29	中度不协调		
	0.1~0.19	高度不协调	0~0.19	病态
	0~0.09	极度不协调		

4　评价结果与分析

4.1　指标权重及分析

本文内置权重系数采用层次分析法确定,经计算判断矩阵最大特征值 $\lambda max = 6.08$,一致性比率 $CR = 0.013(< 0.1)$,满足要求。用户权重系数采用熵权法确定,并结合内置权重系数和用户权重系数得综合权重系数,计算结果见表 1。

4.2　河流健康协调发展状况

将 S1 河段 S2 河段现状评价年 2015 年评价指标实测数据代入式(8)~式(11)中,构建压力、状态、响应因子 3 个子系统要素间协调发展评价模型,评价结果见表 5。可以看出:(1)S1 河段、S2 河段均为状态因子评价函数 $g(y)$ > 压力因子评价函数 $f(x)$ > 响应因子评价函数 $h(z)$,说明需要适当优化调整压力因子下的指标水平(如水资源的开发利用程度)和重点优化调整响应因子下的指标水平(如

表 5 压力、状态、响应因子的协调发展度模型计算结果

Tab. 5 Results calculated with the harmonious development model of pressure, state and response factors

河段	$f(x)/F(x)$	$g(y)/G(y)$	$h(z)/H(z)$	C	T	D
S1	0.504	0.812	0.146	0.418	0.488	0.451
S2	0.676	0.712	0.256	0.462	0.548	0.503
S	0.645	0.730	0.235	0.456	0.537	0.495
等级	S1、S 河段属于弱度不协调类，S2 河段属于弱度协调类；健康状态均属于“亚健康”					

水资源配置程度)，以达到协调压力、状态、响应因子 3 者间相互促进，相互制约的关系；S1 河段 $f(x)$、$h(z)$ 小于 S2 河段 $f(x)$、$h(z)$ 评价函数值，说明 S1 河段压力因子和响应因子的指标水平比 S2 河段较差，其原因主要是 S1 河段周边县域人口密度大，受人类活动影响大，且水资源有效使用率较低(地表水引水率达 92%，地下水开采率达 61%，灌溉水利用系数仅为 0.47)[15,33]；S2 河段 $g(y)$ 小于 S1 河段 $g(y)$ 评价函数值，说明 S2 河段状态因子下的指标水平比 S1 河段较差，其原因主要是 S1 河段至 S2 河段地处塔克拉玛干沙漠边缘，径流沿程耗散较大，且 S1 河段人口分布密度较大，为水资源开发利用高值区，过度的河道外引水及中下游水土开发，使得 S2 河段状态因子的指标水平逐渐变差，如径流沿程天然植被覆盖率下降、土壤盐渍化沙化沿程逐渐加剧及河道内几乎未见指示生物存活等。

(2) S1 河段协调发展度 $D=0.451$，综合评价指数 $T=0.488$，该河段协调发展类型属于“弱度不协调类”，河流健康状况属于“亚健康”等级；S2 河段协调发展度 $D=0.503$，综合评价指数 $T=0.548$，该河段协调发展类型属于“弱度协调类”，健康状况属于“亚健康”等级；S 河段协调发展度 $D_{总}=0.495$，综合评价指数总体 $T_{总}=0.537$，S 河段协调发展类型属于“弱度不协调类”，健康状况属于“亚健康”等级。综合评价结果显示现状年 2015 年叶尔羌河干流卡群至艾里克塔木河段压力、状态、响应因子 3 个子系统要素间均处于过渡协调发展状态，河流健康状况处于由健康向不健康过渡的临界状态，其评价结果与高凡等[15]对叶尔羌河河流健康评价结果基本一致。因此，河流健康状况已受到威胁，需引起有关管理部门重视，维持河流健康的关键是农田灌溉用水效率的提高、河道外土地盐渍化面积的控制，以及流域管理机构对河流综合治理水平的提高和水资源优化配置效率的提升。

5 结 论

(1) 以 2015 年为现状水平年，对叶尔羌河干流段(S 河段)进行健康评价，结果表明：叶尔羌河 S1 河段(卡群断面至依干其渠首断面) S2 河段(依干其渠首断面至艾里克塔木断面)响应因子评价函数 $h(z)$ 均小于压力因子评价函数 $f(x)$ 和状态因子评价函数 $g(y)$，说明需要重点优化调整响应因子下水资源配置程度来维护河流健康；叶尔羌河干流段协调发展度 $D_{总}=0.495$，综合评价指数 $T_{总}=0.537$，协调发展类型属于“弱度不协调类”，健康状况属于“亚健康”等级，即河流处于由健康向不健康过渡的预警状态。

(2) 通过对比已有相关文献，研究成果与实际情况基本符合。河流健康状况已受到威胁，河流健康维护工作势在必行，且在今后河流综合管理方面应考虑提高压力、状态响应因子 3 个系统要素间的协调发展水平，同时应以恢复响应因子下相应指标水平为主。

参考文献(References)：

[1] 闵文武. 辽河流域着生藻类群落结构及水生态健康评价[D]. 大连：大连海洋大学，2015. [Min Wenwu. The Periphytic Algae Community Structure and Stream Ecosystem Health Assessment in Liao River Basin, China[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015.]

[2] 朱卫红，曹光兰，李莹，等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报，2014，34(14)：3 969 – 3 977. [Zhu Weihong, Cao Guanglan, Li Ying, et al. Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3 969 – 3 977.]

[3] 罗贤. 基于生态健康的水利工程对水文连续性影响研究[D]. 南京：南京大学，2012. [Luo Xian. Impacts of Hydraulic Engineering on Hydrological Connectivity Based on Ecology Health: A Case Study in Xitiaoxi Watershed[D] Nanjing: Nanjing University, 2012.]

[4] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. Rapid Bioassessment Protocols Foruse in Streams and Wadable Rivers: Periphyton, Benthic Invertebrates and Fish[M]. 2nd ed. Washington: United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.

[5] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453 – 468.

[6] Kallis G, Butler D. The EU water framework directive: Measures and implications[J]. Water Policy, 2001, 3(2): 125 – 142.

[7] Petersen R. The RCE: A riparian, channel, and environmental in-

ventory for small streams in the agriculture landscape〔J〕. Freshwater Biology,1992,27(2):295－306.
〔8〕 Raven P J,Holmes N T H,Naura M,et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK〔J〕. Hydrobionlogia,422－423,(4):359－367.
〔9〕 Kleynhans C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa)〔J〕. Journal of Aquatic Ecosystem Health,1996,5(1):41－54.
〔10〕 颜涛. 基于环境管理的河流生态健康评价探讨〔C〕//中国环境科学学会. 2014 中国环境科学学会学术年会,2014.〔Yan Tao. Assessment of River Ecological Health Based on Environmental Management〔C〕// Chinese Society of Environmental Sciences. 2014 Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences,2014.〕
〔11〕 高凡. 高强度人类活动区河流健康评价与调控研究——以渭河关中段河流系统为例〔D〕. 西安:西安理工大学,2012.〔Gao Fan. Study on river system health assessment and water resources control on the high intensity area of human activity: An example from Guanzhong Reach of the Weihe River〔D〕. Xi'an:Xi'an University of Technology,2012.〕
〔12〕 赵彦伟,杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探〔J〕. 水科学进展,2005,16(3):349－355.〔Zhao Yanwei,Yang Zhifeng. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health〔J〕. Advances in Water Science,2005,16(3):349－355.〕
〔13〕 吴易雯,李莹杰,张列宇,等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价〔J〕. 湖泊科学,2017,29(5):1 091－1 102.〔Wu Yiwen,Li Yingjie,Zhang Lieyu,et al. Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation〔J〕. Journal of Lake Sciences,2017,29(5):1 091－1 102.)
〔14〕 王勤花,尉永平,张志强,等. 干旱半干旱地区河流健康评价指标研究分析〔J〕. 生态科学,2015,34(6):56－63.〔Wang Qinhua,Wei Yongping,Zhang Zhiqiang,et al. Research on river health evaluation indicators study in arid and semi-arid areas〔J〕. Ecological Science,2015,34(6):56－63.〕
〔15〕 高凡,孙晓懿,蓝利,等. 基于可达最佳状态标准的叶尔羌河健康评价〔J〕. 人民黄河,2017,39(11):103－108,156.〔Gao Fan,Sun Xiaoyi,Lan Li,et al. River health assessment based on achievable maximum state standard in Yarkant River〔J〕. Yellow River,2017,39(11):103－108,156.〕
〔16〕 高宇婷,高甲荣,顾岚,等. 基于模糊矩阵法的河流健康评价体系〔J〕. 水土保持研究,2012,19(4):196－199,211.〔Gao Yuting, Gao Jiarong, Gu Lan, et al. River health assessment system based on fuzzy matrix method〔J〕. Soil and Water Conservation, 2012,19(4):196－199,211.〕
〔17〕 翟晶,徐国宾,郭书英,等. 基于协调发展度的河流健康评价方法研究〔J〕. 水利学报,2016,47(11):1 465－1 471.〔Zhai Jing,Xu Guobin,Guo Shuying,et al. Research on river health assessment method based oncoordinated development degree〔J〕. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(11):1 465－1 471.〕
〔18〕 汤铃,李建平,余乐安,等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法〔J〕. 系统工程理论与实践,2010,30(4):594－602.〔Tang Ling,Li Jianping,Yu Le'an,et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordinated degree model〔J〕. Systems Engineering-Theory & Practice,2010,30(4):594－602.〕
〔19〕 徐海量,樊自立,杨鹏年,等. 塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划的建议〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):223－229.〔Xu Hailiang,Fan Zili,Yang Pengnian,et al. Evaluation on the management of Tarim River and advices for the future planning of the Tarim River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(2):223－229.〕
〔20〕 宋洋,包安明,黄粤,等. 塔里木河综合治理前后干流环境变化〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):230－238.〔Song Yang,Bao Anming,Huang Yue,et al. Eco-environmental change in the main stream area of the Tarim River before and after implementing the comprehensive management project〔J〕. Arid Zone Research, 2016,33(2):230－238.〕
〔21〕 马莲净. 干旱区水文生态与生态需水量研究〔D〕. 西安:长安大学,2011.〔Ma Lianjing. Sesearch on Hydro-eco and Ecological Water Demand for Arid Areas〔D〕. Xi'an:Chang'an University, 2011.〕
〔22〕 李晓峰,刘宗鑫,彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用〔J〕. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(2):14－21.〔Li Xiaofeng,Liu Zongxin,Peng Qing'e. Improved algorithm of TOPSIS Model its application in river health assessment〔J〕. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2011,43(2):14－21.〕
〔23〕 车越,吴阿娜,曹敏,等. 河流健康评价的时空特征与参照基线探讨〔J〕. 长江流域资源与环境,2011,20(6):761－767.〔Che Yue,Wu Enuo,Cao Min,et al. Discussion of river health assessment on spatial and temporal scale and baseline〔J〕. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(6):761－767.〕
〔24〕 张晓天. 山西省城镇化与生态环境协调发展度分析〔D〕. 临汾:山西师范大学,2013.〔Zhang Xiaotian. The Analysis of Urbanization and Ecological Environment Coordinated Development Degree of Shanxi Provice〔D〕. Linfen:Shanxi Normal University, 2013.〕
〔25〕 赵丽娜,徐国宾. 基于协调发展度的冲积河流的河型判别式〔J〕. 泥沙研究,2013(5):10－14.〔Zhao Lina,Xu Guobin. Discrimination of channel patterns based on coordinated developmental degree〔J〕. Journal of Sediment Research,2013(5):10－14.〕
〔26〕 李自明. 基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究〔D〕. 重庆:重庆交通大学,2015.〔Li Ziming. The Application of Multi-level Gray Clustering Model on the Comprehensive Evaluation of River Health〔D〕. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2015.〕
〔27〕 党建华,瓦哈甫·哈力克,张玉萍,等. 吐鲁番地区人口—经济—生态耦合协调发展分析〔J〕. 中国沙漠,2015,35(1):260－266.〔Dang Jianhua, Wahap Halik, Zhang Yuping, et al. Coupling coordinated development of population,economic and ecological system in the Turpan Area of China〔J〕. Journal of Desert Research,2015,35(1):260－266.〕
〔28〕 祖佳嬉,叶长盛,雷慧敏. 江西省县域“三化”协调发展度空间格局演变及其障碍因子诊断〔J〕. 地域研究与开发,2015,34(2):34－39.〔Zu Jiaxi,Ye Changsheng,Lei Huimin. Evolvement of spatial pattern of the coordinated development degree of urbani-

zation, industrialization and agricultural modernization in Jiangxi Provice at County level and diagnosis of its obstacle factors〔J〕. Areal Research and Development, 2015, 34(2): 34 – 39.〕

〔29〕段海燕,肖依静,丁哲,等. 区域人口、经济、能源环境协调发展情景预测研究〔J〕. 人口学刊, 2017, 39(2): 47 – 56.〔Duan Haiyan, Xiao Yijing, Ding Zhe, et al. A study on the scenario prediction on population, economy and energy-environment coordinated development of Jilin Provice in 2030〔J〕. Population Journal, 2017, 39(2): 47 – 56.〕

〔30〕吴玉鸣,柏玲. 广西城市化与环境系统的耦合协调测度与互动分析〔J〕. 地理科学, 2011, 31(12): 1 474 – 1 479.〔Wu Yuming, Bai Ling. Coupling and coordination measurement and interactive analysis of urbanization and environment system in Guangxi Provice, China〔J〕. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(12): 1 474 – 1 479.〕

〔31〕张富刚,郝晋珉,李旭霖,等. 县域土地利用协调发展度评价——以河北省曲周县为例〔J〕. 水土保持通报, 2005, 25(2): 63 – 68.〔Zhang Fugang, Hao Jinmin, Li Xulin, et al. Evaluation of coordinated development degree of land use at County Scale: A case study at Quzhou County of Hebei Provice〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(2): 63 – 68.〕

〔32〕张红,王悦,张志峰. 基于土地"三资特性"的土地管理协调度评价——以北京市为例〔J〕. 中国土地科学, 2013, 27(6): 22 – 27, 52.〔Zhang Hong, Wang Yue, Zhang Zhifeng. Evaluating land management coordination degree based on the "Three Characteristics" of land: A case from Beijing City〔J〕. China Land Sciences, 2013, 27(6): 22 – 27, 52.〕

〔33〕李平. 新疆喀什地区叶尔羌河中下游泥沙特性分析〔J〕. 黑龙江水利科技, 2013, 41(7): 44 – 46.〔Li Ping. Analysis on characteristics of sediment in Ye'erqiang River in Kashi Area, Xinjiang〔J〕. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2013, 41(7): 44 – 46.〕

Health Assessment of the Yarkant River Based on Harmonious Development Degree Model

HE Bing, GAO Fan, TANG Xiao-yu, QIN Shan

(*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: It is very important for the ecological hydrological conservation and river adaptability management in arid inland river basins to determine and evaluate the factors affecting the river health and its change. The river section from Kaqung to Ayriktam of the Yarkant River was considered to be typical, the river health evaluation index system was set up with 23 indexes based on the pressure state response model, and the river health evaluation standards were put forward. On which the theory of coordinated development degree was introduced for assessing the river health, the river health evaluation model was established based on the coordinated development degree, the standard level of the coordinated development evaluation was established and divided, and the river health in 2015 was evaluated and analyzed. The results revealed that the coordinated development index along the river section D_{total} = 0.495, the comprehensive evaluation index T_{total} = 0.537, the type of coordinated development belonged to the "slightly uncoordinated type", and the health status belonged to the "sub-health" level. These revealed that the health of the river was threatened. At the aspect of comprehensive river management in the future, the coordinated development level of stress-state-response factors should be improved, and the corresponding index level under restoration response factors should be dominant.

Key words: coordinated development degree; reachable best standard; PSR model; river health; Yarkant River